



26° Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

Estudo do comportamento mecânico esperado de solos tropicais de granulometria transicional

Rafael Lopes Witiuk¹; Maria Esther Soares Marques¹; Antonio Carlos Rodrigues Guimarães¹

RESUMO

Em virtude da crescente demanda por transporte de carga e da escassez de infraestruturas para o seu escoamento no contexto nacional, tem-se a expectativa de investimentos em ferrovias, principalmente voltados ao escoamento das commodities. Ademais, tendo em vista o elevado impacto ambiental relacionado a execução desse tipo de obra e a escassez de recursos disponíveis, o aproveitamento de jazidas locais para pavimentação e terraplenagem são desejáveis. No entanto, os métodos de classificação de solos disponíveis não possibilitam enquadrar um grupo de materiais finos com menos de 90% de passantes na peneira nº10, bem como não viabilizam a utilização devido à granulometria fina e baixa resistência a penetração em geral apresentada frente a brita padrão da Califórnia. Esses grupo de solos são chamados neste estudo de Solos de Granulometria Transicional (SGT) e, para avaliar a possibilidade de seu uso em pavimentação, foi realizado um estudo de sua caracterização física e mecânica. A partir deste estudo pode-se verificar que o comportamento mecânico dos SGT atendeu aos critérios de aceitação para emprego como camada de sublastro, com tensão admissível de 161 kPa pela equação de Heukelom e apresentando acomodamento aos 150.000 ciclos de aplicação de carga nos ensaios triaxiais de carga repetida.

PALAVRAS-CHAVE: Solos tropicais, sublastro, classificação de solos.

ABSTRACT

Due to the increasing demand for freight transportation and the scarcity of infrastructure for its flow in the national context, there is an expectation of investments in railways, mainly aimed at the transportation of commodities. Furthermore, considering the high environmental impact associated with the execution of this type of project and the scarcity of available resources, the utilization of local deposits for paving and earthwork is desirable. However, the available soil classification methods do not allow for the classification of a group of fine materials with less than 90% passing through the No. 10 sieve, nor do they enable their use due to their fine grain size and low penetration resistance compared to standard California aggregate. This group of soils is referred to in this study as Transitional Granulometry Soils (SGT), and to assess the possibility of their use in paving, a study of their physical and mechanical characterization was conducted. From this study, it was observed that the mechanical behavior of SGT met the acceptance criteria for use as a subbase layer, with an allowable stress of 161 kPa by the Heukelom equation and showing accommodation to 150,000 cycles of load application in repeated triaxial load tests.

KEY WORDS: Tropical soils, Subballast, Soil classification.

¹ Instituto Militar de Engenharia, rlwitiuk@ime.eb.br, esther@ime.eb.br; guimaraes@ime.eb.br

INTRODUÇÃO

Dentre os principais desafios do setor de transportes brasileiro, tem-se a necessidade de atendimento à elevada e crescente demanda da movimentação de grãos no interior do país. A maior parte desta produção é destinada para a exportação e se encontra no interior do país, devendo ser escoada para os portos. Nestas condições, o transporte ferroviário apresenta melhores condições de atendimento a demanda, motivando o desenvolvimento de investimentos em projetos de ampliação deste modo de transporte.



O custo de projetos de infraestruturas lineares, especialmente do tipo ferroviário depende de estudos acerca dos materiais disponíveis na região para obras de terraplenagem e pavimentação. Neste sentido, os sistemas de classificação dos materiais são de grande importância para a aprovação dos solos disponíveis para composição dos aterros e, principalmente, na seleção de jazidas locais para uso como sublastro.

O emprego de solos locais para pavimentação se faz especialmente importante em regiões como a hinterlândia brasileira, em que predomina a ocorrência de solos arenosos lateríticos finos (SALF) com pouca disponibilidade de materiais pétreos. Assim, os materiais locais, em função principalmente do valor do Índice de Suporte Califórnia (ISC) e de sua granulometria não são aceitos pelos métodos de classificação tradicionais, tais quais o *Transportation Research Board* (TRB) e o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). O que demonstra a importância do uso de metodologias específicas para a seleção de solos tropicais, como a sistemática Miniatura-Compactada-Tropical (MCT), que pode reduzir o custo e o impacto ambiental da obra.

Entretanto, frequentemente são identificados em campo solos lateríticos com granulometria incompatível para o uso da metodologia MCT, por apresentarem menos de 90% de passantes na peneira nº10. Nesta perspectiva, o presente trabalho teve como objetivo estudar o comportamento mecânico de solos obtidos em regiões de projetos de ampliação de ferrovias que não podem ser classificados pelo MCT e não atendem aos critérios de seleção tradicionais para pavimentação. Estes materiais são chamados neste trabalho de Solos de Granulometria Transicional (SGT).

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Classificação de solos tropicais

Nogami & Vilibor (2009) evidenciaram a necessidade de se conhecer as propriedades dos solos tropicais brasileiros para o desenvolvimento de projetos de infraestrutura em território nacional. Para eles, os métodos tradicionalmente utilizados na seleção dos solos para pavimentação, oriundos do método do índice de suporte Califórnia (ISC) e da classificação TRB de 1930, não são adequados para caracterização dos solos tropicais uma vez que se fundamentam em critérios de granulometria e de resistência à penetração. Desse modo, não levam em conta as propriedades dos solos finos tropicais, especialmente associados ao seu comportamento laterítico.

O comportamento laterítico dos solos tropicais está associado à hidrólise total da sílica e total ou parcial do potássio, bem como pela formação de óxidos de ferro e alumínio que atuam como cimentantes naturais quando compactados na umidade ótima. O processo de formação destes solos está associado à elevadas taxas pluviométricas e às elevadas temperaturas médias das regiões tropicais que predominam no território nacional (CAVALCANTE *et al*, 2016).

Em decorrência da limitação dos sistemas de classificação tradicionais, e as características experimentais promissoras dos solos lateríticos para pavimentação, em 1974 o DER-SP utilizou as diretrizes defendidas por Vilibor (1974) em sua dissertação de mestrado para estabelecer as primeiras normativas para projetos de pavimentos com uso de bases SALF. Já em 1981 foi apresentada a sistemática MCT como resultado da tese de doutoramento de Job Nogami, em que foram apresentados os ensaios que permitiram a classificação dos materiais de comportamento laterítico para utilização em projetos de pavimentação.



Seleção de materiais para pavimentação

Para obras de pavimentação ferroviária no Brasil atualmente é utilizada a Instrução de Serviço Ferroviário (ISF) 212 - Projeto de Superestrutura da Via Permanente - Lastro e Sublastro elaborado pelo DNIT (2015). Na Tabela 1 estão apresentados os critérios para seleção de material de sublastro.

Tabela 1. Critérios de seleção de materiais para aplicação como sublastro (DNIT, 2015)

Parâmetro	Sublastro
Limite de Liquidez (LL)	$\leq 25,0\%$
Índice de Plasticidade (IP)	$\leq 6,0\%$
Fração de passantes na peneira nº200	$\geq 2,0\%$ e $\leq 25,0\%$
Índice de Suporte Califórnia	$>20,0\%$
Expansão	$<1,0\%$
Fração passante na peneira nº200	$<2/3$ passantes na nº40
Para solos Lateríticos - Expansão	$<0,5\%$
Para solos Lateríticos - Limite de Liquidez (LL)	$\leq 40,0\%$
Para solos Lateríticos - Índice de Plasticidade (IP)	$\leq 15,0\%$
Índice de Grupo (IG)	0

Pode-se observar que as premissas de seleção de materiais apresentados na norma são baseadas em critérios de granulometria, expansão e de índice de suporte Califórnia, que decorrem dos métodos de classificação tradicionais. Em alternativa à esta abordagem a metodologia MCT parte de critérios de perda por imersão e compactação para estimar o comportamento laterítico e a granulometria do solo afim de enquadrá-lo em 6 categorias de solo. Assim, a classificação MCT é dividida em materiais de comportamento laterítico (LA, LA' e LG') e não laterítico (NA, NA', NS' e NG'), subdivididos conforme a sua granulometria, em argilas, siltes e areias, bem como os diversos arranjos granulométricos intermediários. As propriedades das tipologias de solos classificados pelo MCT estão apresentadas na Tabela 2.

No entanto, a classificação apresentada na Tabela 2 limita-se a seleção de materiais de pavimentação com 90% de passantes na peneira nº10, ou seja, é aplicável apenas para solos finos.

No que se refere especificamente a camada de sublastro, tem-se que esta deverá suportar a tensão total vertical nela atuante, que pode ser estimada a partir da Equação 1 proposta por Heukelon e Klomp (1962). Para esta estimativa são necessários os dados de módulo de resiliência da camada do pavimento em função do seu estado de tensões quando solicitado pela composição ferroviária, bem como número N, que exprime a quantidade de eixos que irão trafegar na via ao longo da vida útil da infraestrutura em questão.

$$\sigma_{adm} = \frac{0,006 \cdot MR}{1 + 0,7 \cdot \log N} \quad (1)$$

Estudos realizados por Lopes (2017), Rosa (2019) e Indaratna (2011), evidenciaram que a camada de sublastro usualmente está sujeita às tensões máximas verticais simuladas e aferidas *insitu* da ordem de 120 kPa a 150 kPa.



Tabela 2. Propriedade e utilização de solos pela classificação MCT (Vilibor & Alves, 2017)

Designação			Granulometrias típicas designação do T1-71 do DER-SP						
k=caulinítico m=micáceo s=serícítico q=quartzoso			Areias Siltes (q,s)	Areias Siltosas	Siltes (k,m) Siltes Arenosos	Argilas Argilas arenosas Argilas siltosas Siltes argilosos	Areias	Areias argilosas	Argilas Argilas arenosas Argilas siltosas Siltes argilosos
Comportamento			N = Não Laterítico L=Laterítico						
Grupo MCT			NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'
Propriedades	Mini-CBR	sem imersão	M,E	E	M,E	E	E	E,EE	E
		perda por imersão	B,M	B	E	E	B	B	B
	Expansão (%)		B	B	E	E	B	B	B
	Contração (Ct)		B	B,M	M	M	B	B,M	M,E
	Coef. De Permeabilidade (k)		M,E	B	B,M	B,M	B,M	B	B
	Coef. De Sorção (s)		E	B,M	E	M,E	B	B	B
	Corpos de prova compactados na massa específica aparente seca máxima da energia normal		EE=Muito elevado E=Elevado M=Médio B=Baixo						
Utilização *	Base de pavimento		n	4º	n	n	2º	1º	3º
	Reforça do subleito compactado		4º	5º	n	n	2º	1º	3º
	Subleito Compactado		4º	5º	7º	6º	2º	1º	3º
	Aterro (corpo) compactado		4º	5º	6º	7º	2º	1º	3º
	Proteção à erosão		n	3º	n	n	n	2º	1º
	Revestimento primário		5º	3º	n	n	4º	1º	2º
* A "utilização" é representada em prioridade de escolha (1º, 2º, 3º ...), sendo "n" não recomendado									

MATERIAIS E METODOS

Apresentação da região do estudo de caso

O estudo de caso considerou a região do projeto de ampliação ferroviária próximo a Rondonópolis/MT. O tipo climático predominante na região, apresenta-se como Tropical de Savana - Aw, caracterizado por estação chuvosa no verão e estação seca no inverno, com temperatura média do mês mais frio superior a 18 °C e precipitação do mês mais seco menor que 60 mm. As precipitações anuais são superiores a 750 mm, atingindo até 1.800 mm (EMBRAPA, 2020).

Foram realizadas 9 coletas de amostras em que foram identificados materiais de granulometria incompatível com os sistemas de classificação tradicionais e com a metodologia MCT. Sua localização está apresentada na Figura 1. Destaca-se a profundidade das coletas realizadas, que variam de 0,74 m a 3,5 m, o que corresponde às espessuras de solos mais superficiais.

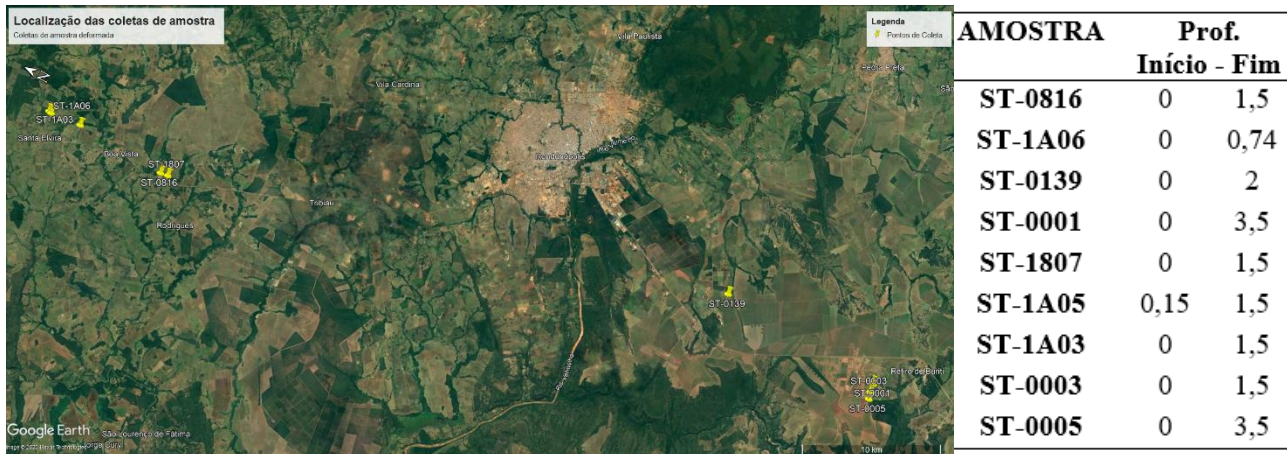


Figura 1. Mapa de localização das coletas de amostra

Ensaios geotécnicos realizados

Para obtenção dos parâmetros de classificação dos solos pelas metodologias utilizados no presente trabalho, foram realizados os ensaios de caracterização cujas normas de referência estão apresentadas na Tabela 3.

Em relação ao sequenciamento dos ensaios, primeiramente foi realizada a preparação das amostras para os ensaios de caracterização. Na sequência, foram realizados os ensaios de granulometria, limites, índice de suporte Califórnia (ISC), densidade real e MCT. A partir dos resultados destes ensaios, foi selecionado uma amostra representativa para realização dos ensaios triaxiais de carga repetida para determinação do módulo de resiliência e deformação permanente.

Tabela 3. Normativa dos procedimentos e ensaios realizados

Nº	Ensaio	Norma
01	Ensaio de granulometria	NBR 7181 (ABNT, 2016)
02	Ensaio de determinação do limite de liquidez	NBR 6459 (ABNT, 2016)
03	Ensaio de determinação do limite de plasticidade	NBR 7180 (ABNT, 2016)
04	Ensaio de compactação	NBR 7182 (ABNT, 2016)
05	Ensaio de índice de suporte Califórnia	NBR 9895 (ABNT, 2016)
06	Ensaio de densidade real	NBR 6458 (ABNT, 2017)
07	Solos e agregados miúdos – determinação da umidade com emprego do “Speedy”.	DNER-ME 052/94 (DNIT, 1994a)
08	Ensaio triaxial de carga repetida – Módulo de Resiliência	ME 134/2018 (DNIT, 2018)
09	Ensaio triaxial de carga repetida – Deformação permanente	ME 179/2018 (DNIT, 2018)
10	Ensaio de compactação mini-MCV	DNIT 254/2023-ME, DNIT 228/2023-ME,
11	Ensaio de perda por imersão	DNIT 258/2023-ME
12	Classificação MCT	DNIT 259/2023-CLA,
13	Classificação G-MCT	Adaptado de Villibor e Alves (2017)
14	Preparação de amostras para ensaios de caracterização	ABNT 6457/2016
15	Rochas e solos - terminologia	NBR 6502 (ABNT, 1995)

Para viabilizar a análise do comportamento do solo em termos de deformação permanente foi realizado o ensaio triaxial com frequência de 5 Hz e 150.000 aplicações de carga para determinação



da deformação permanente a partir de 6 corpos de prova ensaiados nos pares de tensões confinante e desvio de 20 kPa/40 kPa, 20 kPa/60 kPa, 40 kPa/80 kPa, 40 kPa/120 kPa, 80 kPa/160 kPa e 80 kPa/240 kPa, respectivamente.

Por fim, foi aplicado o modelo de Guimarães (2009) conforme preconiza a norma ME 179 do DNIT (2018) para enquadramento do comportamento do material em termos de deformações plásticas, afim de determinar se ocorre o acomodamento das deformações ao longo dos ciclos de aplicação de cargas, conhecido como *Shakedown*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A descrição tátil-visual dos materiais ensaiados é apresentada na Tabela 4, em que pode-se observar a predominância de materiais arenosos com presença de pedregulhos ou não, de coloração avermelhada, amarelada e marrom.

Tabela 4. Descrição tátil-visual das amostras estudadas

AMOSTRA	Descrição Tátil-Visual
ST-0816	Areia (fina) argilosa, amarela
ST-1A06	Areia (fina), argilosa, marrom amarelada clara, com presença de lateritas
ST-0139	Argila arenosa, vermelha escura, com pedregulhos
ST-0001	Areia fina com pedregulho argiloso, vermelho
ST-1807	Areia (fina a média), pouco argilosa, marrom, com pedregulhos (finos a médios)
ST-1A05	Areia (fina) argilosa, marrom avermelhada clara, com presença de lateritas
ST-1A03	Pedregulho areno argiloso, marrom amarelada escura
ST-0003	Pedregulho areno argiloso, vermelho
ST-0005	Areia fina argilosa com pedregulho, vermelho

Os resultados obtidos para os ensaios de granulometria estão apresentados na Tabela 5 e pode-se observar que todas as amostras apresentam menos de 90% de passantes na peneira nº10, o que inviabiliza sua classificação pela sistemática MCT.

Tabela 5. Distribuição granulométrica das amostras analisadas.

AMOSTRA	PENEIRAS/ % PASSANTES										
	1"	3/4"	3/8"	nº4	nº10	nº16	nº30	nº40	nº60	nº100	nº200
ST-0816	97,6	95,0	87,0	64,9	44,4	38,9	32,0	26,2	19,3	15,8	12,5
ST-1A06	97,8	97,6	88,3	71,8	58,7	50,9	42,3	39,6	36,5	35,4	33,3
ST-0139	100,0	100,0	98,8	59,3	47,2	42,5	39,9	39,0	37,6	31,0	21,8
ST-1807	95,2	94,2	86,8	63,0	48,8	42,9	38,2	36,8	35,1	34,0	30,3
ST-1A05	100,0	100,0	95,4	73,2	44,2	38,0	32,9	31,5	30,1	29,7	28,6
ST-1A03	97,3	95,7	89,6	63,3	37,4	29,5	25,7	24,8	23,8	23,4	22,7
ST-0003	100,0	98,2	83,4	72,0	65,1	64,6	63,1	60,9	53,3	40,8	33,0
ST-0005	100,0	99,4	97,6	90,0	82,8	81,8	79,3	76,2	66,3	53,7	41,0

Os ensaios de limites e a classificação TRB e SUCS estão apresentados na Tabela 6 e evidenciam a ocorrência de índices de plasticidade que variam de 9% a 14% e classificação predominante destes solos como sendo A-2-4.



Tabela 6. Limites físicos e classificação TRB e SUCS das amostras analisadas.

AMOSTRA	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IG	TRB	SUCS
ST-0816	26,0	17,0	9,0	0	A-2-4	SC
ST-1A06	30,0	23,0	7,0	0	A-2-4	SM
ST-0139	33	24	9,0	0	A-2-4	SC
ST-1807	29,0	21,0	8,0	0	A-2-4	SC
ST-1A05	30,0	22,0	8,0	0	A-2-4	SC
ST-1A03	42,0	33,0	9,0	0	A-2-5	SC
ST-0003	31,8	17,5	14,3	1	A-2-6	SC
ST-0005	30,8	18,6	12,2	2	A-6	SC

Os ensaios mecânicos de compactação e índice de suporte Califórnia apresentaram os resultados evidenciados na Tabela 7, em que pode-se observar que as amostras ST-0816, ST-1A06 e ST-0139, possuem ISC superior a 20%. O critério de expansão é atendido em todas as amostras tendo em vista que nenhum apresenta mais de 1% de expansão.

Tabela 7. Índice de suporte Califórnia, compactação e massa específica das amostras.

AMOSTRA	Energia de Compactação	Peso específico seco máximo (g/cm ³)	Umidade Ótima (%)	CBR (%)	Expansão (%)	Massa específica Real (g/cm ³)
ST-0816	PN	2,03	9,71	37,30	0,05	2,58
ST-1A06	PN	1,88	15,70	26,29	0,13	2,55
ST-0139	PN	1,83	14,50	23,40	0,10	2,76
ST-1807	PN	1,91	13,66	15,71	0,10	2,56
ST-1A05	PN	1,90	12,60	14,70	0,14	2,52
ST-1A03	PN	1,83	16,40	12,97	0,13	2,59
ST-0003	PN	1,71	14,80	12,00	0,10	2,83
ST-0005	PN	1,68	17,40	9,90	0,10	2,84

Por fim, a Tabela 8 e a Figura 4 contêm os resultados dos parâmetros do método MCT, como a perda por imersão (Pi) e os coeficientes d' e c' oriundos da compactação mini-CBR, bem como a classificação MCT e G-MCT resultante. Observa-se que todos os materiais analisados apresentam comportamento laterítico e que não ocorreram solos classificados como solo com pedregulho (Sp).

Tabela 8. Coeficientes e classificação MCT das amostras estudadas.

AMOSTRA	d''	c'	Pi'	e'	MCT	Pen. nº 10	Pen. nº 200	G-MCT
ST-0816	44,1	1,24	45	0,97	LA'	44,4	12,5	Ps-LA'
ST-1A06	34,1	1,34	82	1,12	LA'	58,66	33,3	Gf-LA'
ST-0139	26,3	0,38	142	1,3	LA	47,2	21,8	Ps-LA
ST-1807	33,3	1,15	82	1,12	LA'	48,82	30,35	Gf-LA'
ST-1A05	37,5	1,53	112	1,18	NA'	44,23	28,63	Ps-LG'
ST-1A03	37,5	1,91	85	1,11	LG'	37,43	22,74	Ps-LG'
ST-0003	50	0,39	102	1,12	LA	65,09	32,98	Gf-LA
ST-0005	41,7	0,5	95	1,13	LA	82,75	40,97	Gf-LA

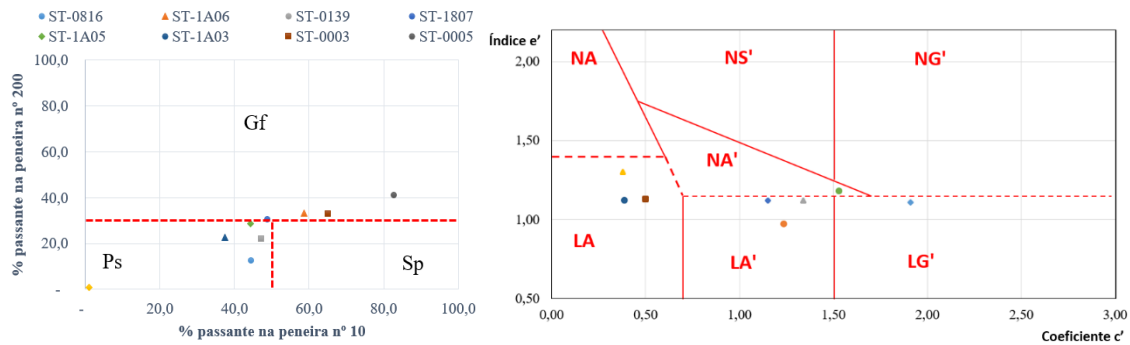


Figura 2. Classificação dos solos estudados pelo G-MCT (esq.) e MCT (dir).

A partir dos resultados de classificação apresentados acima e das propriedades físicas dos materiais estudados foi selecionada a amostra ST-1A03 para realização dos ensaios mecânicos triaxiais de cargas repetidas, tendo em vista que esta amostra apresentou a menor proporção de passantes na peneira nº10 e atendeu ao menor número de critérios de granulometria para aceitação em sublastro. Os resultados consolidados do ensaio de módulo de resiliência e de deformação permanente do material são apresentados na Figura 5. Para o estado de tensões do sublastro, em que se tem tensões confinantes de 40 kPa e tensões desvio de 140 kPa, o módulo de resiliência estimado a partir da regressão pelo modelo composto deste solo, apresentado na Equação 2, é da ordem de 146 MPa.

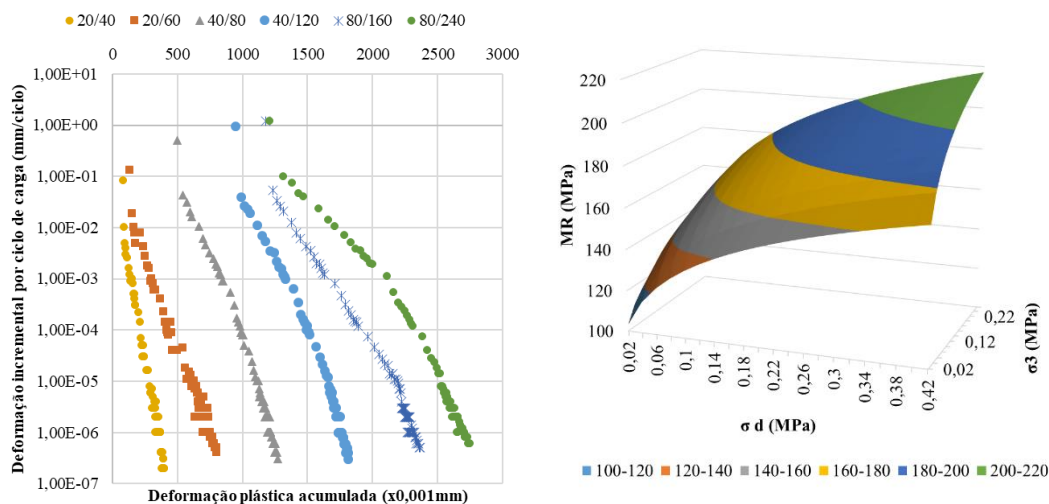


Figura 3. Curvas de deformação da amostra ST-1A03 para verificação da ocorrência do *shakedown* (a esq.) e resultado gráfico do modelo composto para estimativa do módulo de resiliência (à dir).

$$MR = 286,485 * \sigma_3^{0,105} * \sigma_d^{0,156} \quad (2)$$

Considerando a expectativa de número de eixos padrão de $2,2 \times 10^6$, obtém-se pela Equação 1, uma tensão admissível no sublastro da ordem de 161 kPa. O resultado da tensão admissível para o sublastro está próxima do limite de tensão para o qual a referida camada é sujeita na passagem das composições ferroviárias, que vai até 150 kPa segundo Lopes (2017), para uma carga por eixo de 40



t. Em relação a deformação permanente, tem-se que o material em questão apresenta deformação máxima acumulada de 2,89 mm após a passagem 150.000 eixos.

Ademais, na Figura 3 são apresentadas as curvas de taxa de acréscimo da deformação para cada ciclo de carga e a deformação permanente total acumulada dos ensaios para pesquisa da ocorrência *do Shakedown*. Observa-se a formação de um ângulo relativamente fechado entre a curva e o eixo vertical, bem como uma linearidade das curvas, o que expressa um comportamento de acomodação das deformações plásticas. Pode-se verificar ainda que as taxas de deformação permanente de todos os pares de tensões apresentaram taxas de acréscimo de deformação da ordem de 10^{-7} , exceto para os ensaios em que foram utilizadas tensões desvio de 240 kPa e 160 kPa com tensão confinante de 80k Pa.

CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos pode-se identificar que o solo de granulometria transicional estudado apresenta comportamento mecânico satisfatório para ser empregado enquanto camada de sublastro, uma vez que níveis de deformação permanente do material, além de baixos por se limitarem a 2,89 mm, também apresenta acomodação das deformações ao longo dos ciclos de aplicação de carga. Quanto ao comportamento elástico do material, pode-se afirmar que seu módulo de resiliência se encontra dentro dos limites aceitáveis para sua utilização no sublastro, podendo admitir tensões verticais totais de até 161 kPa. Desse modo, pode-se concluir que o solo pode ser empregado em pavimentação mesmo que não atenda aos critérios classificatórios tradicionais e tampouco possa ser classificado pela metodologia MCT.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cavalcante, A. C.; Ribeiro, M. R. B. M.; Nunes, C.Y.; Sousa, J. G. M; Delgado, B.G. (2016). Análise Mecânica da Aplicabilidade de Solos Constituintes de Sublastro em Pavimentos Ferroviários, por meio de Parâmetros obtidos por Correlações com a Classificação MCT para Solos da Região Norte do Brasil - In: XVIII, CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, Belo Horizonte. DOI:10.20906/CPS/GJ-08-0013.
- DNIT (2015). Departamento nacional de infraestrutura e transporte. ISF – 212: Projeto de superestrutura da via permanente – lastro e sublastro. 2015.
- Embrapa. (2020). Clima. Disponível: <https://www.cnpf.embrapa.br/pesquisa/efb/clima.htm>. Acesso 20 de abril de 2023.
- Indraratna, B., Salim, W., Rujikiatkamjorn, C. In: Advanced rail geotechnology Ballasted Track, Taylor & Francis Group, London, UK, 2011.
- Lopes, L. S. (2017). Análise experimental do comportamento hidráulico e mecânico de um pavimento ferroviário.
- Guimarães, A. C. R. (2009). Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 367.
- Rosa, A. C., de Oliveira Teixeira, M. A., Guimarães, A. C. R., de Oliveira, L., da Cruz, S. R., Pires, D. C. D. A. F., & de Freitas, R. G. (2019). Avaliação estrutural de pavimentos ferroviários do corredor centro sudeste paulista utilizando o software SysTrain. In 33 Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET.
- Vilarinho, M. K. C., Koetz, M., Schlichting, A. F., de Carvalho Silva, M., & Bonfim-Silva, E. M. (2013). Determinação da taxa de infiltração estável de água em solo de cerrado nativo. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada-RBAI, 7(1).
- Villibor, D. F. (1974). Utilização de solos arenosos finos na execução de bases para pavimentos de baixo custo. São Carlos - Dissertação de Mestrado em Transportes–Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP).



Villibor, D. F. e Alves, D. M. L. (2017). Classificação de Solos Tropicais de Granulação Fina e Grossa. Revista Pavimentação, Ano XII, nº 43, p. 17 a 37. Ed: ABPv. Rio de Janeiro,RJ, BRASIL

Villibor, D. F., & Nogami, J. S. (2009). Pavimentos Econômicos: tecnologia do uso dos solos finos lateríticos. Editora Arte & Ciência.